

# 기어 백래쉬로 인한 응답지연 및 추종오차 억제방안에 관한 연구

## A Study on Response Time Delay and Tracking Error Suppression Strategy in Gear Mechanism : Control System Design Approach

만손트란\* · 최은호\* · 김영복\*\*\*†

Manh Son Tran\*, Eun-Ho Choi\* and Young-Bok KIM\*\*\*†

(Received 27 June 2017, Revision received 19 July 2017, Accepted 19 July 2017)

**Abstract:** The aim of this paper is to solve the chattering and delayed response problems caused by gear backlash. In the gear mechanism based systems, for example, in robot systems, the actuators provide the reduction gear with motors to transfer effectively electric power to mechanical power. Therefore, the gear backlash exists and is an unavoidable fact which makes many undesirable problems. In this paper, the authors try to make a solution for this issue and, introduce several control methods which are PID only, PID with Smith predictor and super-twisting algorithm based SMC(sliding mode control). Each control method is applied to the real plant in which strong backlash is included. By comparison results, it is clear that SMC gives the best control performance with little backlash effects. Also, the usefulness and effectiveness of proposed control method is verified by experiment.

**Key Words :** Chattering, Gear backlash, Time delay, Smith predictor, Control performance, Super-twisting algorithm, Sliding mode control

### 1. 서 론

기어 메커니즘은 동력을 전달하거나, 운동방향과 운동특성을 변환하는 장치로, 자동차, 선박, 로봇 등 산업전반에 걸쳐 이용되고 있는 중요한 기계요소이다. 기어의 기본적인 적용목적은 회전수의 변화와 동력의 증감이다. 이를 대표하는 것이 감속기이며, 감속기는 주요 동력전달장치로 활용된다. 특히 본 연구에서 관심을 갖는 분야는 로봇

시스템이다. 로봇에는, 로봇 암의 효율적 운동제어를 위해 암 각각에 독립적으로 운동전달메커니즘을 장착하고 있다. 즉 모터 및 감속기가 일체가 되어 운동 제어신호를 효과적으로 전달함으로써 로봇모션을 제어한다. 감속기는 기어메커니즘으로 앞서 기술하였듯이, 기어 간의 원활한 운동을 위해서는 적당한 간극이 필연적으로 존재한다. 이것은 기어설계방법, 기어의 크기 등과도 밀접하게 관련되어 있으며, 일반적으로 백래시라 칭한다.

\*\*\* 김영복(교신저자) : 부경대학교 기계시스템공학과  
E-mail : kpjiwoo@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6197  
\*최은호, 만손트란 : 부경대학교 대학원 기계시스템공학과

\*\*\* Young-Bok Kim(corresponding author) : Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University.  
E-mail : kpjiwoo@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6197  
\*Eun-Ho Choi, Manh Son Tran : Department of Mechanical System Engineering, Graduated School, Pukyong National University.

백래시는 안정적인 운전조건에서, 일정한 방향 및 일정한 속도유지를 목적으로 운전되는 동력전달 장치에는 큰 문제를 발생시키지 않을 수도 있다. 그러나 빈번한 속도변화, 연속적인 회전방향 변화가 요구되는 운동제어시스템 등에서는 심각한 문제를 일으킨다. 예를 들어 로봇암의 각도제어 문제에서, 설정된 목표값을 추종하기 위해서는, 제어출력신호를 실시간으로 확인하여 제어기는 보정신호를 생산하게 된다. 이 제어신호는 일반적으로 교류형태의 신호이고, 크기와 부호가 변한다. 결국 구동기어 축의 동작특성의 연속적인 변화를 가져오므로, 구동기어는 피동기어에 충격적인 특성을 전달하게 된다. 이러한 부자연스러운 동력전달 메커니즘으로 인해 구동기어와 피동기어 간에는 불연속적인 동력전달(시간지연) 및 바람직하지 않은 떨림 현상인 채터링(chattering) 현상이 발생하게 된다.<sup>1)</sup> 특히, 항공기에 탑재되는 촬영장치인 짐벌 (Gimbal)에는 고해상도 카메라를 장착하고 있으며, 감속기 백래시로 인한 채터링은 절대로 허용되지 않는다.<sup>2)</sup> 획득되는 영상의 질을 떨어뜨릴 뿐만 아니라, 화상처리를 통해 목표물을 추적하는 트래킹 성능을 저하시키게 된다. 이러한 이유로 최근에는 감속기가 없는 직접구동방식을 채택하는 경향이이나, 모터 용량이 커짐으로써 또 다른 문제점이 발생하는 등의 다양한 문제점을 안고 있는 것이 현실이다. 따라서 본 연구에서와 같이 로봇암을 제어해야 하는 경우에는 로봇에 추가되는 부하변동 등으로 인해 직접구동방식을 도입하는 것이 어려워, 백래시로 인해 수반되는 문제를 반드시 해결해야 할 과제이다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로는, 백래시를 하나의 동적특성으로 간주하여 모델링에 반영하는 경우와, 백래시를 시간지연함수로 간주하여 제어기를 설계하는 것의 두 가지로 정리된다.

위에 열거한 해결방안에서는, 백래시가 그다지 크지 않거나, 속도제어문제 등 제어신호변화가 빈번하지 않는 등의 다소 안정적인 운전조건을 고려하고 있다.<sup>3-5)</sup> 그렇기 때문에 실제 시스템에 적용했을 경우, 이론적 결과와는 달리 기대했던 수

준의 바람직한 결과를 얻지 못하는 것이 사실이다. 따라서 본 연구에서는, 지금까지의 연구결과를 참고로 하여, 큰 백래시를 갖는 실제 시스템을 대상으로 제어특성을 개선하기 위한 방안에 대해 고찰하고자 한다. 주된 연구내용 및 개선방안은 제어계 구축에 중점을 두고 있다. 즉 백래시의 영향을 억제하여 제어성능을 확보할 수 있는 효과적인 제어계 설계방법을 고려한다. 다양한 제어계 설계법을 적용하고, 그 결과로부터 가장 효과적인 제어기법을 실제 시스템에 적용하여 그 유효성을 검증한다.

## 2. 제어대상의 모델링

본 연구에서의 제어대상, 즉 백래시 문제를 해결해야 할 대상은 Fig. 2에 나타난 로봇에 장착된 구동장치의 하나이며, 규격은 Table 1에 나타내었다. Fig. 2에 나타난 로봇은 5자유도로 구성되어 있고, 각 자유도는 각각의 구동장치(모터 및 감속기)에 의해 독립적으로 제어된다.

구조상 로봇 왼쪽 끝단에서 하부측으로 진행할 수록 구동장치 용량은 커진다. 즉 가장 말단인 로봇 고정단 하부(점선박스 부 및 상세 확대 부분)는 가장 용량이 큰 구동장치가 장착되어 있다.

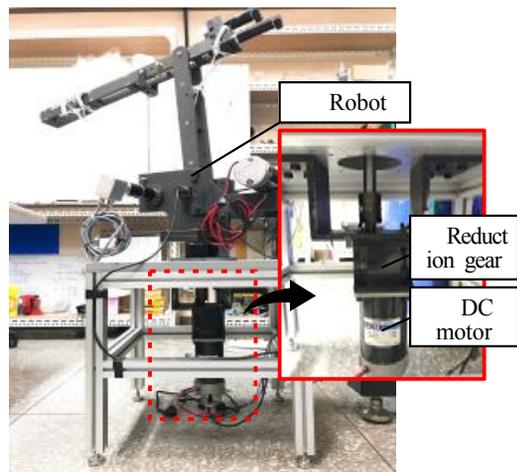


Fig. 1 Actual model of robot arm

Table 1 Specification of the actuator system

Items	Parameters	Specification
Motor	Input Voltage	12 [V]
	Rated current	9 [A]
	Rated speed	3000 [rpm]
	Rated power	120 [W]
Reduction Gear	Reduction rate	120 : 1
Encoder	Resolution	3000 [pulse/revolution]
Motor drive	Allowable Voltage	12-28 [V]
	Allowable Current	12 [A]

구동토크가 작은 구동장치 감속기에는 백래시가 거의 존재하지 않으나, 말단에 장착된 장치는 상대적으로 구동토크가 크고, 감속기는 상당히 큰 백래시(4[deg])를 갖는다. 이로 인해 위 서론에서 기술한 모든 문제점들이 발행하여 저자가 기대하는 수준의 운동제어 특성을 달성하기가 어렵다.

따라서 본 연구에서는, 서론에서 기술한 것과 같이 다양한 제어기법을 적용하고, 그 결과로부터 가장 바람직한 방법을 찾도록 한다.

말단 부 구동장치는 로봇 구조물 전체의 평면 운동, 즉 회전운동을 제어한다. 따라서 회전 운동 제어시스템을 설계하기 위해 백래시를 고려한 모터 구동 회전운동시스템을 수식으로 표현하도록 한다. 본 연구에서는 백래시를 시간지연함수로 나타내는데, 결국 전체 시스템 모델은 선형전달함수와 시간지연함수의 결합으로 표현한다.

단, 제어대상의 복잡한 구조 상, 수식모델은 실험을 통해 구한다. 속도제어문제가 아닌 경우에는 단순 페루프시스템을 구축하여 시스템응답을 구하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 개루프상태에서 펄스형의 입력신호를 인가하고 이에 대한 응답으로부터 적절한 모델을 구한다. 여기서 모델링 대상은 구동모터, 감속기 및 로봇 전체 구조물이 된다.

모델링을 위해 수행한 실험 및 시뮬레이션 비교평가 결과를 Fig. 2 ~ Fig. 4에 나타내었다.

먼저 Fig. 2는 펄스형의 모터 구동전압이며, 이에 대한 로봇의 회전운동각도를 나타낸 것이

Fig. 3이다. 실험결과는 Matlab 시스템동정 함수에서 적절한 모델을 탐색하는데 이용하였다.

우선 시간지연 항을 제외한 선형의 전달함수를 구한다. 설계자가 구하고자 하는 모델의 차수를 임의로 지정함으로써 실험대상과 모델과의 유사도를 파악할 수 있는데, 그 결과를 Table 2에 나타내었다. Fig. 4는 실험결과와 시뮬레이션 결과를 비교한 것으로, 3차 시스템의 경우 유사도가 가장 우수하였음을 확인하였다. 여기서 선형전달함수를  $G_n(s)$ 로 나타내면, 시간지연 항을 포함한 구동장치의 전체 전달함수  $P(s)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$P(s) = G_n(s)e^{-t_b s} \tag{1}$$

Table 2 Fitting ratio of various robot arm models for real plant

Model	Fitting ratio (%)
1 pole	80.48
2 poles	81.03
3 poles	81.88

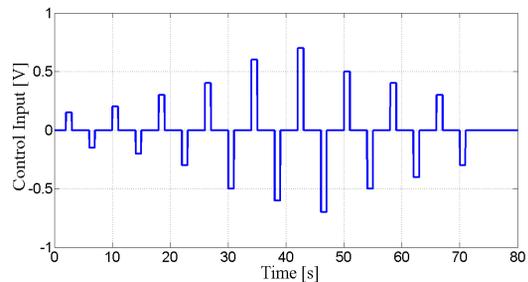


Fig. 2 Input signal used to identify the robot arm model

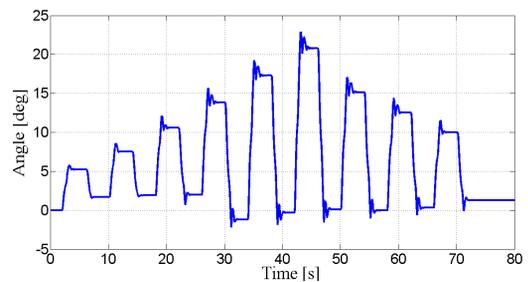


Fig. 3 Rotation angle as output signal used to identify the robot arm actuator system

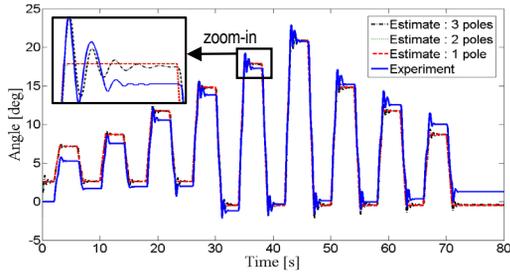


Fig. 4 Comparison results (experiment and simulation)

여기서  $e^{-t_b s}$ 는 백래시를 표현하는 시간지연 항이며, 시간지연  $t_b = 0.09$ 이고, 이것은 실험데이터를 기초로 Matlab 함수(delayest)를 이용하여 구하였다.

결국 시간지연 항을 포함한 구동장치 모델은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$P(s) = \frac{4004}{s^3 + 6.377s^2 + 100.5s + 0.8665} \cdot e^{-0.09s} \quad (2)$$

### 3. 제어기 설계

본 연구에서는 설계한 제어계의 비교평가를 통해 저자가 달성하고자 하는 수준의 제어성능을 달성할 수 있는 제어기를 선정하도록 한다. 비교평가 대상인 제어기는

- i) PID
- ii) PID+Smith Predictor(스미스 예측기)<sup>6)</sup>
- iii) 슈퍼 트위스팅 알고리즘 기반 SMC(슬라이딩 모드 제어기)<sup>8,9)</sup> : 이하 STSMC 이다.

여기서 PID 제어기는 적용이 수월한 가장 일반적인 제어기법이고, PID 제어기로 달성하기 어려운 시간지연의 영향을 보상하기 위해 스미스 예측기를 도입한다. 이론상으로는 스미스 예측기만으로도 시간지연의 영향을 억제할 수 있는 것으로 알려져 있다.

먼저 스미스 예측기에 대한 이해를 돕기 위해 이론적으로 간단히 설명한다. Fig. 5는 스미스 예측기가 도입된 제어계를 나타내고 있다.

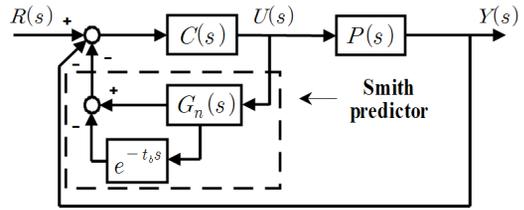


Fig. 5 Block diagram of time delay compensation system with Smith predictor

여기서  $R(s)$ ,  $U(s)$ ,  $Y(s)$ 는 목표값, 제어입력, 제어출력을 각각 나타낸다.  $C(s)$  제어기, 전술한 것과 같이  $P(s)$ 는 제어대상,  $G_n(s)$ 는 제어대상에서 시간지연 항을 제외한 선형전달함수이다. Fig. 4의 제어계의 페루프 전달함수를 구하면

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)G_n(s)} \quad (3)$$

가 된다. 여기서 주목해야 할 것은 식 (3)의 전달함수 분모에는 시간지연 항이 포함되어 있지 않다는 것을 알 수 있다. 즉 시간지연을 갖는 제어 대상에 대해 스미스 예측기를 도입함으로써 시간지연의 영향을 억제할 수 있다는 것을 의미한다. 스미스 예측기에 대한 평가는 다음 절에서 수행한다.

마지막으로 실제 제어대상에 적용했을 때 가장 효과적인 제어성능을 달성할 수 있는 기법으로 알려진 슬라이딩 모드 제어기이다. 슬라이딩 모드 제어기를 도입한 페루프계를 Fig. 6에 나타내었다.

특히 본 연구에서 도입한 슬라이딩 모드 제어기는 STSMC 즉, 슈퍼 트위스팅 알고리즘(super-twisting algorithm)<sup>8,9)</sup>을 적용한 것이다. 이 방법은 일반적인 슬라이딩 모드 제어기법에서 발생하는 채터링 현상을 억제할 수 있는 것으로 알려져 있다. 아울러 외란억제 성능 및 추종성능도 우수하고, 제어기 이득도 PID 이득을 결정하는 수준으로 쉽게 구할 수 있다. (상세내용은 참고문헌 참조)

본 연구에서의 제어대상은 3차이므로, 2차계 슬라이딩 평면을 사용하여 슬라이딩 평면의  $\sigma(e)$ 가 0으로 수렴하도록 하면 된다.<sup>8,9)</sup> 이때 제어계에 도

입되는 각 파라미터 및 함수는 일반적인 슬라이딩 모드 제어기 설계기법에 따른 것으로, 다음 식으로 정리된다.

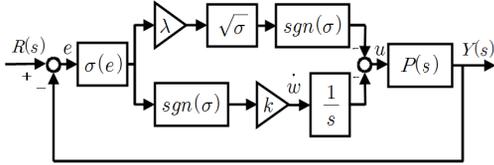


Fig. 6 Block diagram of Sliding Mode Control system (super twisting algorithm)<sup>8,9)</sup>

$$\sigma(e) = \ddot{e} + c_1 \dot{e} + c_0 e \quad (4)$$

$$\text{sgn}(\sigma) = \begin{cases} 1 & (\sigma < 0) \\ -1 & (\sigma > 0) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \dot{u} = -\lambda \sqrt{\sigma} \text{sgn}(\sigma) - w \\ \dot{w} = k \text{sgn}(\sigma) \end{cases} \quad (6)$$

#### 4. 실험결과 및 비교평가

지금부터는 3장에서 구한 각 제어기의 제어성능을 비교 평가하도록 한다.

즉 세 가지 제어기법을 제어대상에 적용하여 제어성능을 살펴본다.

각 제어기의 제어이득은 각각 다음과 같다.

i) PID 제어기만 적용한 경우의 제어이득

$$K_p = 0.038, K_I = 0.001, K_D = -0.006$$

ii) PID와 Smith Predictor(스미스 예측기)를 적용한 경우의 PID 제어이득

$$K_p = 0.055, K_I = 0.008, K_D = -0.004$$

iii) STSMC

식 (4)~(6)에 정의한 상수 값

$$c_0 = 200, c_1 = 12, \lambda = 0.01, k = 0.01$$

이때, i) 및 ii)의 경우에서 PID 제어기 이득은, Matlab의 이득 최적화 툴을 이용하여 일차적으로 구하고, 응답특성을 살펴보면서 약간의 이득조정을 수행하여 결정하였다.

그리고 슬라이딩모드 제어기 이득은 super twisting 알고리즘<sup>8,9)</sup>을 기반으로 결정하였다.

위 세 가지 제어기를 제어대상에 적용하고 실험을 수행하였다.

먼저, Fig. 7은 PID 제어기를 적용한 경우의 목표값(회전각도) 추종성능을 나타내고 있다. 로봇이 평면상에서 회전해야 할 목표각도는 계단형태의 정형적인 값이 아니고, 임의의 각도로 회전시킬 경우를 고려하여 비정형의 포물선 형태로 인가하였다. 이때 그림에서 제일 상단은 로봇암의 회전각도를 나타낸다.

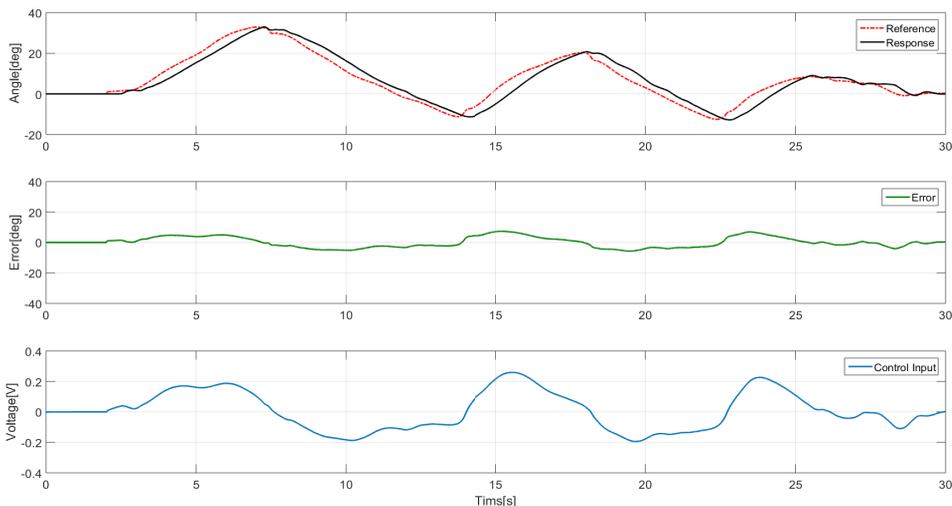


Fig. 7 Experiment results (PID control)

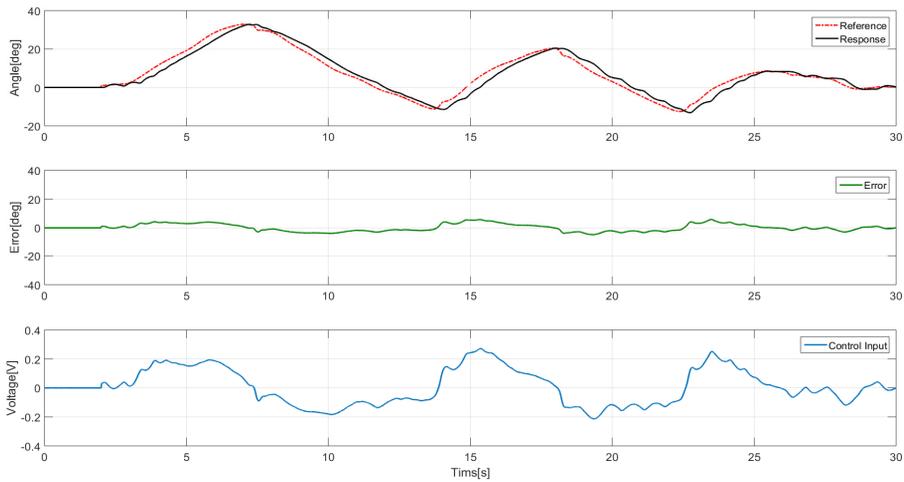


Fig. 8 Experiment results (PID+Smith predictor)

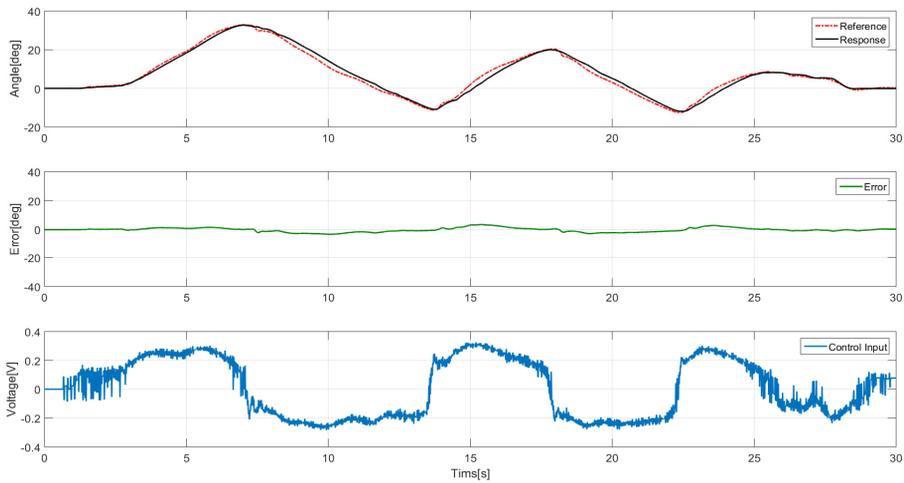


Fig. 9 Experiment results (Sliding Mode Control based on super-twisting algorithm)

가운데 그림은 목표값에 대한 추종오차, 제일 하단 그림은 모터구동전압(제어입력)을 나타낸다. PID제어의 경우, 예상대로 백래시의 영향으로 시간지연 현상이 뚜렷하며, 결과적으로 상당히 큰 오차가 발생하고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 PID제어를 기반으로 스미스 예측기를 병용한 경우이다. Fig. 7의 경우와 동일한 조건에서 실험을 수행하였으며, 예측기능의 영향으로 제어성능이 다소 개선되었다는 것을 알 수 있다. 그러나 여전히 백래시로 인한 시간지연현상이 뚜렷하게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

마지막으로 Fig. 9는 슬라이딩 모드 제어를 적용한 경우이다. 위 두 가지 제어기법에 비해 시간지연현상이 뚜렷하게 개선되었고, 상당히 우수한 제어성능이 달성되었음을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 기어 백래시로 인해 직면하게 되는 문제해결방안에 대해 고찰하였다. 백래시는 시간지연으로 추종성을 저하시킬 뿐만 아니라, 정상상태에서는 채터링 현상을 유발시키는 등 다

양한 문제발생의 근원이기도 하다. 특히 본 연구에서의 제어대상은 다 자유도로 구성되는 로봇의 일부 구동장치이다. 구동장치 일부에서 발생하는 백래시는 로봇의 전체 운동제어성능에 영향을 미치게 되므로, 반드시 해결해야 한다.

본 연구에서는 5자유도 로봇 암 중, 첫 번째 자유도에 해당되는 말단 부 구동장치의 백래시를 억제하기 위한 방안에 대해 고찰하였다. 제어기 설계법을 통해 백래시에 의한 시간지연현상을 억제함으로써 추종오차를 줄여 결국 제어성능을 개선할 수 있었다. 세 가지 제어기법을 실제 시스템에 적용하고, 실험결과에 대한 비교평가를 통해 제안하는 제어기법의 유효성을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 2016년도 중소기업청 산학협력기술개발사업 도약과제 지원사업으로 수행되었음(과제번호 : C0445861, 과제명 : 모션 자기 인식이 가능한 소규모 도장용 로봇 개발).

## References

1. R. M. R. Bruns, J. Diepstraten, X. Schuurbiens and J. Wouters, 2006, "Motion control of systems with backlash", Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, pp. 1-27.
2. S. J. Kim, D. H. Moon and Y. B. Kim, 2014, "Synchronized control of active harmonic gear system", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 18, No. 2, pp. 112-119.
3. J. E. Normey-Rico and E. F. Camacho, 2007, "Control of dead-time processes", London: Springer, pp. 131-137.
4. R. Merzouki and J. C. Cadiou, 2005, "Estimation of backlash phenomenon in the electromechanical actuator", Control Engineering Practice, Elsevier, Vol. 13, pp. 973-983.
5. T. S. Wu, M. Karkoub, H. Wang, H. S. Chen and T. H. Chen, 2017, "Robust tracking control of MIMO underactuated nonlinear systems with dead-zone band and delayed uncertainty using an adaptive fuzzy control", IEEE Transaction on Fuzzy Systems, Issue 99, pp. 1-13 (on-line DOI: 10.1109/TFUZZ.2016.2586970).
6. G. Mahmoud, S. Nayera, R. Mohamed, A. Saoud and K. Ahmed, 2016, "Delay compensation using Smith predictor for wireless network control system", Alexandria Engineering Journal, Vol. 55, pp. 1421-1428.
7. D. Ma, H. Lin, and B. Li, 2017, "Chattering-free sliding-mode control for electromechanical actuator with backlash nonlinearity", Journal of Electrical and Computer Engineering, Vol. 2017, Article ID 6150750, pp. 1-8.
8. W. B. Lin and H. K. Chiang, 2013, "Super twisting algorithm second-order sliding mode control for a synchronous reluctance motor drive", Mathematical Problems in Engineering, Vol. 2013, Article ID 632061, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/632061>.
9. C. Heng, Z. Jamaludian, A. Hashim, L. Abdullah and N. Rafanm 2017, "Design of super twisting algorithm for chattering suppression in machine tool", International Journal of Control, Automation and Systems, <http://dx.doi.org/10.1007/s12555-016-0106-7>.